

文章编号: 1674—8247(2022)04—0087—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.04.014

## 不同净距下浅埋分岔隧道力学行为研究

邢渝遥 谢义正

(重庆交通大学, 重庆 400074)

**摘 要:**文章以重庆市嘉滨路连接道为工程背景,采用有限元法与现场监控、量测对不同净距下浅埋分岔隧道力学行为进行了研究,结果表明:(1)对于围岩位移来说,隧道净距越大,连接断面水平收敛就越大,净距越小,连接断面拱顶及拱底的竖向位移就越大;(2)对于初期支护应力,沿隧道方向的初支应力主要集中在连接断面前 2 m 的小净距隧道拱脚处以及中夹岩左右侧拱肩处,且隧道过渡段初期支护主应力随净距的增加而减小。

**关键词:**浅埋分岔隧道;小净距隧道;围岩位移;不同净距;数值模拟

**中图分类号:**U45 **文献标志码:**A

## Study on Mechanical Behavior of Shallow-buried Bifurcation Tunnels with Different Clear Distances

XING Yuyao XIE Yizheng

(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Based on the case study of Jiabin Road connecting road in Chongqing, this paper studies the mechanical behavior of shallow-buried bifurcation tunnels with different clear distances by using the finite element method, field monitoring, and measurement. The results show that: (1) For the displacement of surrounding rock, the larger the tunnel clearance, the greater the horizontal convergence of the connecting section, and the smaller the clearance, the greater the vertical displacement of the crown and the invert of the connecting section. (2) As for the primary support stress, the primary support stress along the tunnel direction is mainly concentrated at the arch springing of the close-spaced tunnel of 2 m in front of the connecting section and at the arch spandrels on the left and right sides of the intermediate rock, and the primary support principal stress of the transition section of the tunnel decreases with the increase of the clear distance.

**Key words:** shallow-buried bifurcation tunnel; close-spaced tunnel; surrounding rock displacement; different clear distances; numerical simulation

近年来,为缓解地面交通拥堵,地下立交隧道建设应运而生。地下隧道常常设计成分岔形式,分岔隧道过渡段由不同断面形式组合而成,如小净距与大跨的过渡、连拱与大跨的过渡以及连拱与小净距的过渡等。然而,考虑到隧道在变截面处极易产生应力集中,可能

导致围岩变形严重,分岔隧道过渡段的设计与施工是隧道建设的重难点之一<sup>[1-3]</sup>。

目前国内对分岔隧道的研究主要集中于施工方面,如对分岔隧道反向扩挖法<sup>[4]</sup>、三台阶临时仰拱法<sup>[5-6]</sup>、无中导洞施工工法<sup>[7]</sup>等不同施工方法进行研

收稿日期:2022-06-06

作者简介:邢渝遥(1997-),女,硕士研究生。

引文格式:邢渝遥,谢义正. 不同净距下浅埋分岔隧道力学行为研究[J]. 高速铁路技术,2022,13(4):87-92.

XING Yuyao, XIE Yizheng. Study on Mechanical Behavior of Shallow-buried Bifurcation Tunnels with Different Clear Distances[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4):87-92.

究分析。此外,在分岔隧道施工力学行为方面的研究也不少,如张俊儒<sup>[8]</sup>等利用“以索代撑”的思想,并结合围岩强度高的特点,提出主动支护的钢架岩墙组合支撑法并对其进行工法优化。安永林<sup>[9]</sup>等揭示了左右线分岔四洞隧道依次施工的相互影响规律,提出在设计施工时应注意加强过渡段的支护。张富鹏<sup>[10]</sup>等对比分析反向扩挖法和传统中隔墙法对分岔隧道的影响,证明两种工法均能保证隧道施工安全,但反向扩挖法更优。叶伦<sup>[11]</sup>对分岔隧道施工力学特性的研究分析中,对支护手段提出优化建议。

综上所述,目前国内对分岔隧道的研究已经较为深入,不少专家学者都得出了相对完整的成果结论,但在分岔隧道净距方面的研究还存在一些不足。因此,文章依托嘉滨路连接道分岔隧道,开展不同净距对分岔隧道影响研究,对隧道围岩位移以及初支应力状态进行分析。

## 1 工程概况

### 1.1 工程地质条件

重庆环道三期工程嘉滨路连接道分岔隧道过渡段里程为 K 0 + 008.000 ~ K 0 + 048.000,位于重庆市渝中区解放碑。该工程旨在缓解市中心地区地面交通拥堵情况,提高地下立交系统的利用率和周转率,综合改善市中心交通拥堵的状况。分岔隧道小净距段最大埋深 18.1 m,隧道净宽 9 m,净高 7.4 m;大跨段最大埋深 12.6 m,隧道净宽 23 m,净高 13.232 m。

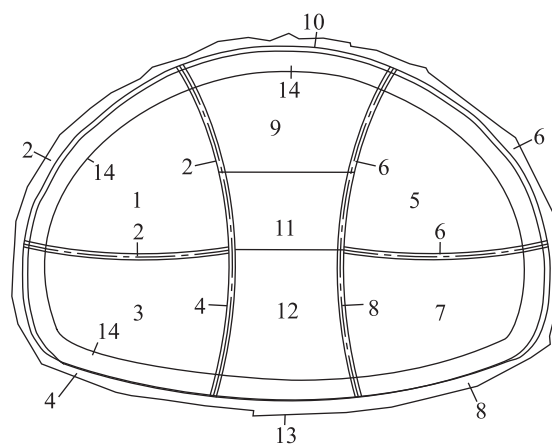
经现场地质勘测后得,嘉滨路连接道原始地形地貌属于构造剥蚀浅丘地貌,位于解放碑向斜西翼,岩层走向与分岔隧道 K 0 + 008 ~ K 0 + 048m 段走向斜交角度小(为 40° ~ 44°)。该段隧道所处范围内地下水贫乏,水文地质条件简单。分岔隧道上覆土层厚约 0.5 ~ 2 m,主要是杂填土,在场地大部分范围均有分布,下伏侏罗系中统沙溪庙组中厚层砂岩、泥岩。隧道围岩级别为Ⅳ级,岩体整体强度较高。

### 1.2 分岔隧道开挖方法

分岔隧道过渡段由小净距隧道和大断面隧道连接而成,小净距隧道采用全断面法开挖,先开挖左洞后开挖右洞;大断面隧道采用双侧壁导坑法开挖,施工顺序如图 1 所示,开挖进尺均为 1 m。

### 1.3 分岔隧道初期支护参数

小净距段左右洞初支参数:采用  $\phi 25$  mm 的砂浆锚杆,长 3.5 m,间距 1 m  $\times$  0.8 m,梅花形布置;喷射混凝土采用厚 270 mm 的 C30 混凝土;钢架采用 I20b 型



1. 左侧壁导坑上台阶开挖; 2. 左侧壁导坑上台阶初期支护施作;
3. 左侧壁导坑下台阶开挖; 4. 左侧壁导坑下台阶初期支护施作;
5. 右侧壁导坑上台阶开挖; 6. 右侧壁导坑上台阶初期支护施作;
7. 右侧壁导坑下台阶开挖; 8. 右侧壁导坑下台阶初期支护施作;
9. 中夹岩上台阶开挖; 10. 中夹岩上台阶初期支护施作; 11. 中夹岩中部开挖; 12. 中夹岩下台阶开挖; 13. 中间下台阶初期支护施作;
14. 隧道二衬施作

图1 双侧壁导坑法施工顺序图

钢,纵向间距 0.8 m;钢筋网采用单层  $\phi 8$  HPB300 钢筋。大跨段初支参数:采用 R28 mm 的中空锚杆,长 5 m,间距 0.8 m  $\times$  0.55 m,梅花形布置;喷射混凝土采用厚 320 mm 的 C30 混凝土;钢架采用 HW250  $\times$  250 mm 型钢,纵向间距 0.55 m;钢筋网采用双层  $\phi 8$  HPB300 钢筋。

## 2 数值模拟模型

### 2.1 假定条件

(1)围岩满足连续、均质和各向同性的弹塑性模型假定。

(2)不考虑地下水影响。

(3)不考虑土体时空效应。

(4)岩土体本构满足 M - C 屈服准则。

(5)土体开挖不影响土体力学参数。

(6)初期支护为理想弹性材料。

### 2.2 模型概况

采用 MIDAS GTS/NX 软件建立不同净距条件下的分岔隧道数值模型,如图 2 所示。考虑模型边界后尺寸选为 140 m  $\times$  80 m  $\times$  60 m,隧道参数及岩体条件按照设计图纸设置。模型整体共 61 160 个单元,40 003 个节点。模型中隧道的施工步骤为:小净距段左洞→小净距段右洞→大跨段左导坑→大跨段右导坑→大跨段中夹岩。

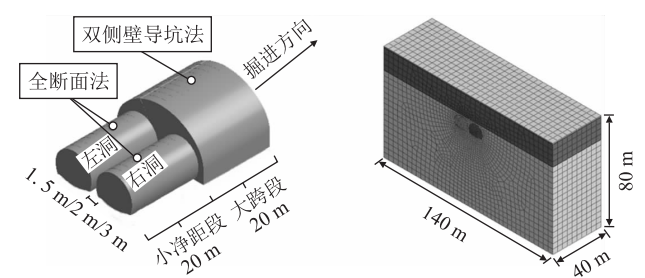


图 2 数值模型概况图

2.3 材料参数

依据现场地质勘测报告及 JTG 3370.1-2018《公路隧道设计规范》得出模型中材料的物理力学参数,如表 1 所示。

表 1 材料物理力学参数表

材料	容重 $\gamma$ / (kN/m <sup>3</sup> )	粘聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\phi$ /(°)	泊松比 $\nu$	弹性模量 $E$ /MPa
填土	20	50	25	0.41	200
砂岩	25.2	300	38	0.3	3 488
泥岩	25.9	210	34	0.36	1 655
喷混	22	—	—	0.2	30 300
锚杆	78.5	—	—	0.26	$2 \times 10^5$

2.4 主要研究内容

参照嘉滨路连接道实际工程情况设计 3 种不同净距方案:1.5 m 净距、2 m 净距和 3 m 净距。采用数值仿真对 3 种不同净距下的分岔隧道施工分别进行模拟,通过对比分析不同净距下围岩位移及初期支护结构受力,为分岔隧道过渡段建设给出合理化建议。

3 不同净距计算结果分析

选取分岔隧道连接断面( $Y=20\text{ m}$ )作为分析的主要对象。

3.1 不同净距对水平收敛的影响

不同净距下过渡段小净距断面和大跨断面的水平收敛随施工步的变化曲线如图 3 所示。

由图 3(a)可知,小净距隧道开挖时,不同净距对连接处断面的水平收敛几乎不产生影响。大跨隧道开挖时,不同净距对水平收敛的影响明显变大。小净距段净距为 3 m 时对水平收敛的影响最大,净距为 1.5 m 时对水平收敛的影响最小,左洞相差 0.2 mm,右洞相差 0.17 mm。

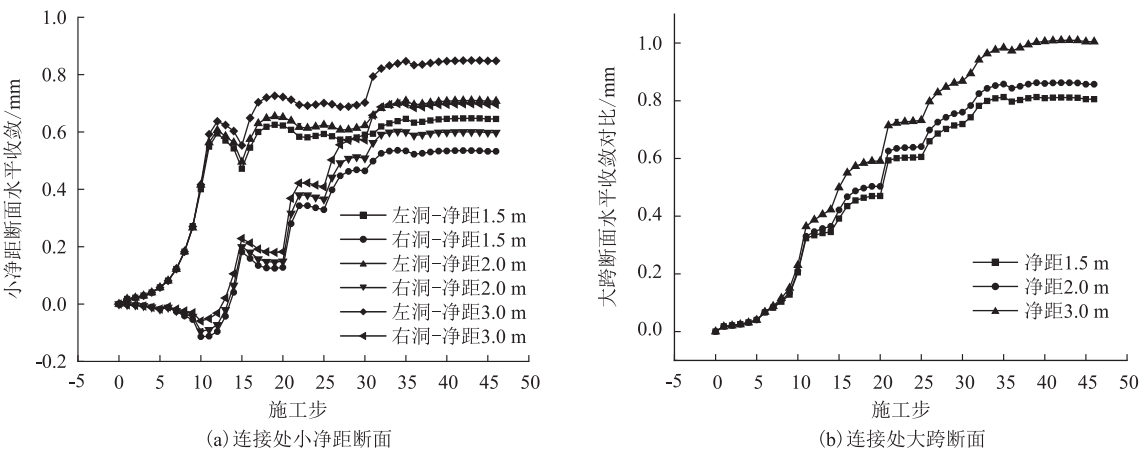


图 3 分岔隧道不同净距条件下围岩水平收敛的影响图

由图 3(b)可知,小净距隧道开挖对不同净距下大跨断面的水平收敛影响很小。大跨隧道开挖时,不同净距对大跨断面的水平收敛影响增大,小净距段净距 3 m 时水平收敛最大,收敛最大值为 1 mm,净距为 1.5 m 时水平收敛最小,收敛最大值为 0.81 mm。

3.2 不同净距对拱顶沉降的影响

不同净距下小净距断面和大跨断面拱顶围岩竖向位移随施工步变化曲线如图 4 所示。

由图 4(a)可知,不论是小净距隧道开挖,还是大

跨隧道开挖,不同净距对连接处小净距隧道的拱顶沉降影响非常小。隧道贯通后,与小净距隧道净距为 1.5 m 和 2 m 相比,当净距为 3 m 时,连接处小净距断面的拱顶沉降略小。

从图 4(b)可知,在小净距隧道开挖时,不同净距对连接处大跨断面的拱顶沉降影响极小;当大跨隧道开挖时,净距对大跨断面拱顶沉降的影响逐渐变大。小净距隧道净距为 3 m 时拱顶沉降最小,最终沉降值为 1.52 mm,当净距为 1.5 m 时,拱顶沉降最大,最终沉降值为 1.69 mm。

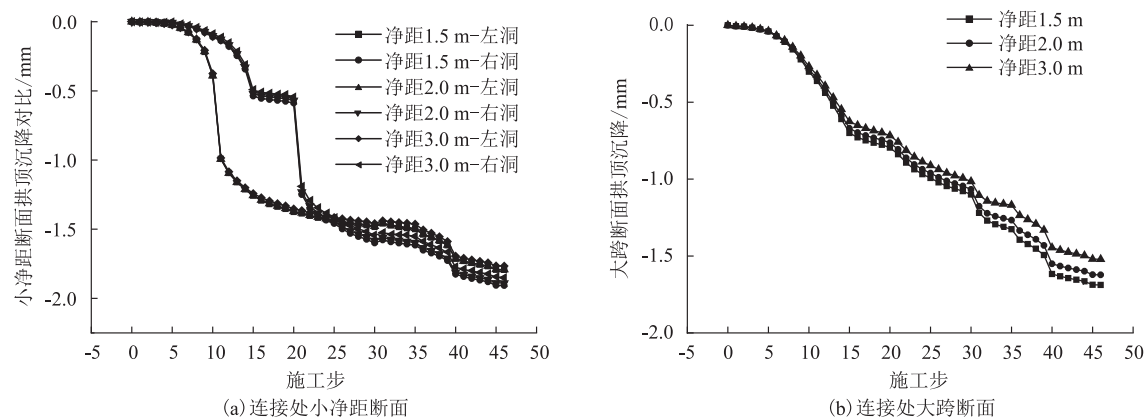


图 4 分岔隧道不同净距条件下围岩拱顶沉降的影响图

3.3 不同净距对拱底隆起的影响

分岔隧道连接处小净距断面及大跨断面拱底的竖

向位移随施工步变化曲线图如图 5 所示。

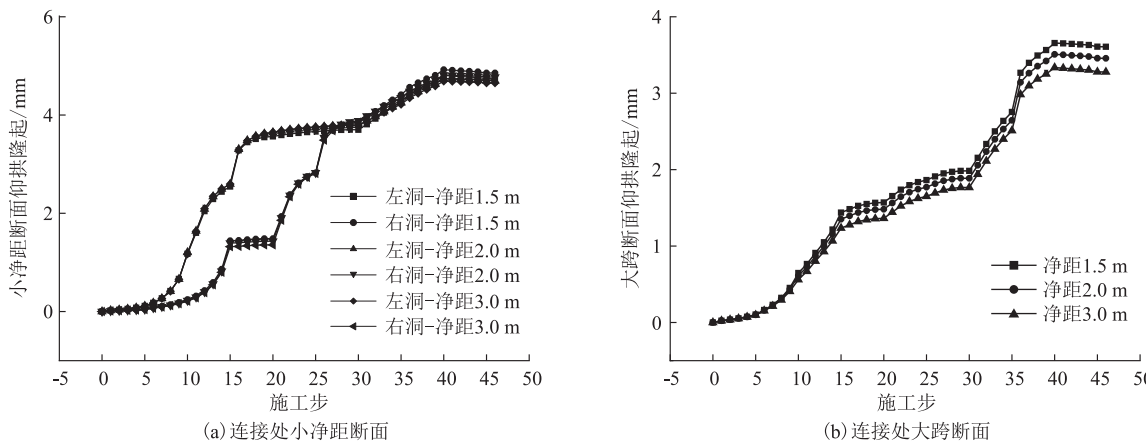


图 5 分岔隧道不同净距条件下围岩拱顶沉降的影响图

从图 5(a)可知,不同净距对连接处小净距断面拱底隆起几乎不产生影响,且 3 种不同净距下左右洞的最终隆起值都约为 4.7 mm。

由图 5(b)可知,大跨隧道开挖时 3 种不同净距对大跨断面拱底隆起的影响较大。小净距隧道净距为 1.5 m 时拱底隆起值最大,为 3.61 mm,其次是净距为

2 m 和 3 m,隆起值分别为 3.46 mm 和 3.28 mm。

3.4 不同净距对过渡段初支应力的影响

分岔隧道初期支护应力状态分布较为复杂,应力集中现象主要集中在分岔隧道的连接处,如图 6、图 7 所示(以分岔隧道连接处两端各 2 m 范围为例)。

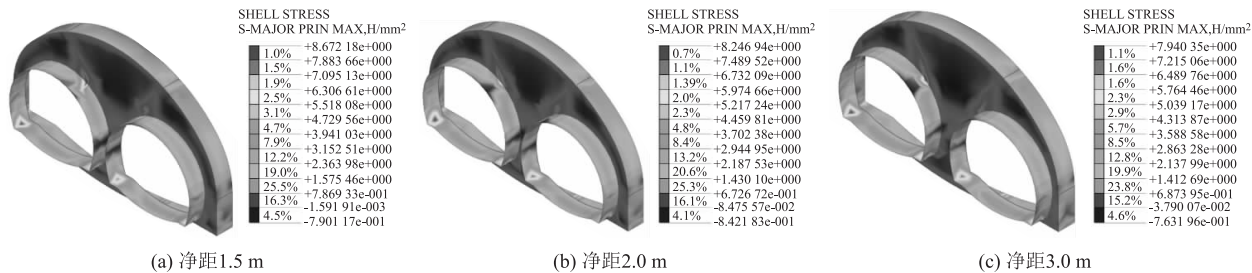


图 6 连接断面最大主应力云图

由图 6、图 7 可知,隧道开挖完成后,分岔隧道连接段初期支护最大及最小主应力主要集中在连接断面

前 2 m 小净距段左右拱脚处和中夹岩柱内侧左右拱肩处。提取应力集中处的 6 个观测点初期支护最大及最



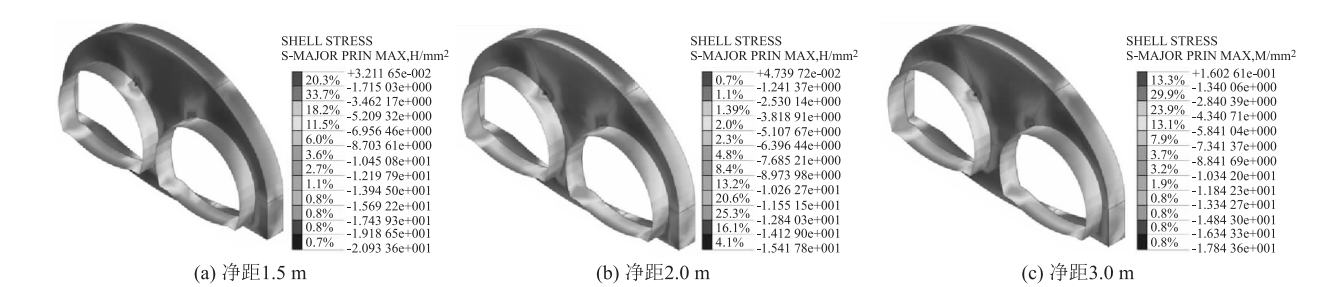


图 7 连接断面最小主应力云图

小主应力如表 2、表 3 所示。

表 2 分岔隧道连接处初期支护最大主应力表 (MPa)

工况	中夹岩 左拱肩	左洞 左拱脚	左洞 右拱脚	中夹岩 右拱肩	右洞 左拱脚	右洞 右拱脚
净距 1.5 m	11.53	8.48	7.17	11.71	7.65	8.28
净距 2 m	10.64	8.25	7.13	9.48	7.54	8.24
净距 3 m	8.54	7.94	7.02	7.58	7.25	7.54

表 3 分岔隧道连接处初期支护最小主应力表 (MPa)

工况	中夹岩 左拱肩	左洞 左拱脚	左洞 右拱脚	中夹岩 右拱肩	右洞 左拱脚	右洞 右拱脚
净距 1.5 m	-35.49	-11.38	-9.19	-34.88	-9.40	-11.18
净距 2 m	-31.64	-11.34	-9.16	-28.20	-9.31	-11.16
净距 3 m	-29.64	-11.06	-9.09	-27.08	-9.24	-10.70

由表 2、表 3 可知,隧道开挖完成后分岔隧道连接段初期支护最大主应力最大值发生在中夹岩柱右侧拱肩处,约为 11.71 MPa;最小主应力最大值发生在中夹岩柱左侧拱肩处,约为 35.49 MPa。此外,隧道净距越大,初期支护的最大及最小主应力越小。

4 监控量测数据对比

选取嘉滨路连接道分岔段监控量测断面对小净距断面(里程为 ZK 0+048 和 YK 0+048 处),将数值模拟中的拱顶竖向位移(净距为 3 m 时)和实际监控量测结果(净距为 1.5 m)进行对比分析,如图 8 所示。

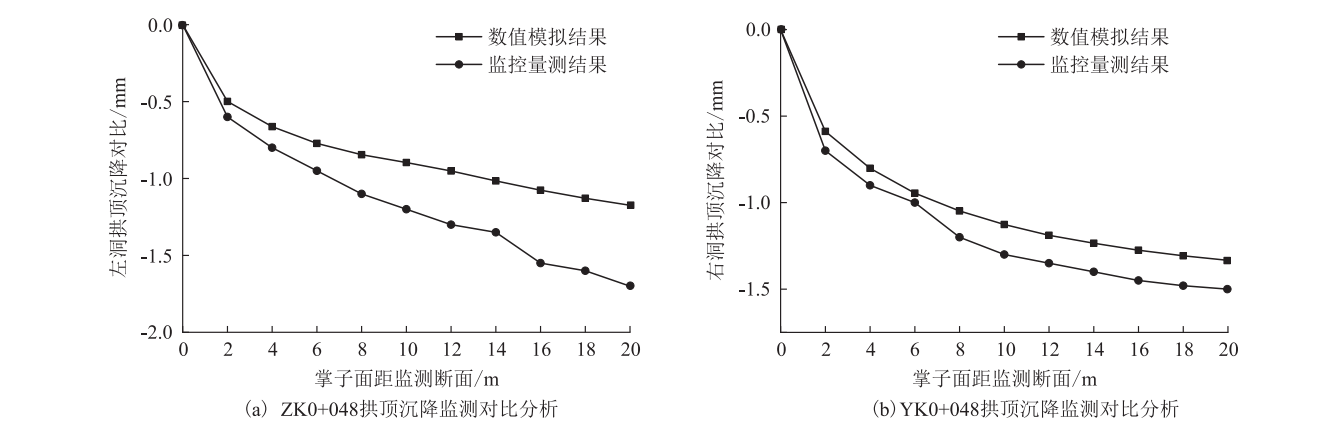


图 8 拱顶沉降监测对比图

由图 8 可知,数值模拟结果与实际监控量测数据趋势基本吻合,且净距为 3 m 时数值模拟的拱顶沉降小于实际监控量测的拱顶沉降,这说明适当增大净距会减小围岩的拱顶沉降。

5 结语

通过对重庆市嘉滨路连接道施工全过程的数值模拟,对比分析了不同净距下分岔隧道过渡断面的围岩位移与初支应力状态,得到主要结论如下:

(1)分岔隧道过渡段开挖会对连接处小净距及大跨断面的围岩水平收敛、拱顶及拱底竖直位移产生较

大的影响。分岔隧道围岩水平位移最大值发生在大跨段,约为 1.01 mm;围岩竖向位移最大值发生在小净距段拱底处,约为 4.7 mm。

(2)隧道净距越大,连接断面水平收敛就越大;净距越小,连接断面拱顶及拱底的竖向位移就越大。

(3)隧道贯通后沿隧道方向的初支应力主要集中在连接断面前 2 m 的小净距隧道拱脚处以及中夹岩左右侧拱肩处。同时,连接断面处会发生应力集中现象,建议在分岔隧道连接处加强支护以及严格监测。

(4)分岔隧道净距越大时,初期支护的最大主应

力及最小主应力越小。初支最大主应力最大值发生在中夹岩柱右侧拱肩处,当净距为 1.5 m 和 3 m 时,最大值分别为 11.71 MPa 和 7.58 MPa。初支最小主应力最大值发生在中夹岩柱左侧拱肩处,净距为 1.5 m 和 3 m 时,其最大值分别为 35.49 MPa 和 29.64 MPa。

(5)数值模拟结果与实际监控量测的拱顶沉降趋势大致吻合,研究具有一定合理性。增加小净距隧道间距至 3 m 对围岩拱顶沉降有一定的优化。

参考文献:

[1] 张俊儒,吴洁,严丛文,等. 中国四车道及以上超大断面公路隧道修建技术的发展[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 14-31.  
ZHANG Junru, WU Jie, YAN Congwen, et al. Construction Technology of Super-Large Section of Highway Tunnels with Four or more Lanes in China[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 14-31.

[2] 刘学强. 分岔隧道阶梯状变化段施工力学特性研究[J]. 公路, 2017, 62(7): 316-321.  
LIU Xueqiang. Study on the Mechanical Characteristics of Construction in the Stepped Change Section of the Bifurcation tunnel [J]. Highway, 2017, 62(7): 316-321.

[3] 胡新朋,王登锋,肖本利. 分岔隧道安全高效施工方法优化研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S2): 210-215.  
HU Xinpeng, WANG Dengfeng, XIAO Benli. Optimization of Safe and Efficient Construction Method for Bifurcated Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(S2): 210-215.

[4] 闫自海,章立峰,路军富,等. 城市地下立交隧道交叉口施工方法研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(1): 176-184.  
YAN Zihai, ZHANG Lifeng, LU Junfu, et al. Study on Construction Method of the Intersection of the Urban Underground Interchange Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(1): 176-184.

[5] 方刚,丁春林,贾润枝,等. 变截面大跨隧道开挖施工力学特性分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 258-263.  
FANG Gang, DING Chunlin, JIA Runzhi, et al. Mechanical

Properties Analysis of Large Cross-Section Tunnel with Variable Cross-Section[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(S2): 258-263.

[6] 任东平. 铁路隧道三线分岔大跨段变截面施工技术[J]. 铁道建筑, 2021, 61(12): 105-108.  
REN Dongping. Construction Technology of Variable Cross-Section for Three-Line Bifurcation and Large-Span Section of Railway Tunnel [J]. Railway Engineering, 2021, 61(12): 105-108.

[7] 谈识,丁文其,吴官胜,等. 城市分岔隧道无中导洞施工工法分析研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 15-23.  
TAN Shi, DING Wenqi, WU Guansheng, et al. Analysis and Study of the Construction Method of the Urban Forked Tunnel without Central Pilot Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(S2): 15-23.

[8] 张俊儒,徐剑,龚彦峰,等. 单跨5车道公路隧道工法优化及施工力学特性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(5): 831-840.  
ZHANG Junru, XU Jian, GONG Yanfeng, et al. Study on Construction Method Optimization and Construction Mechanical Characteristics of a Single-Span Five-Lane Highway Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(5): 831-840.

[9] 安永林,李佳豪,雷明锋,等. 左右线分叉四洞隧道施工力学特性三维分析[J/OL]. 铁道科学与工程学报:1-11.  
An Yonglin, Li Jiahao, Lei Mingfeng, et al. Three Dimensional Analysis of Construction Mechanical Characteristics of Left and Right line Bifurcated Four Tunnel[J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering:1-11.

[10] 张富鹏,雷胜友,杨瑞,等. 超小净距分岔式隧道施工方法数值模拟研究[J]. 中国科技论文, 2019, 14(2): 157-163.  
ZHANG Fupeng, LEI Shengyou, YANG Rui, et al. Numerical Simulation of the Construction of Forked Tunnels with Super Small Spacing[J]. China Sciencepaper, 2019, 14(2): 157-163.

[11] 叶伦. 超大扁平五车道市政隧道过渡小净距隧道施工力学行为研究[D]. 四川:西南交通大学,2020.  
YE Lun. Study on the Mechanical Behavior of the Transition from the Super Flat Municipal Tunnel with Five Lanes to the Small Clear Distance Tunnel[D]. Sichuan: Southwest Jiaotong University,2020.